

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 58-119293

(43)Date of publication of application : 15.07.1983

(51)Int.Cl.

H04R 3/00
H04R 3/00

(21)Application number : 57-001396

(71)Applicant : NIPPON COLUMBIA CO LTD

(22)Date of filing : 08.01.1982

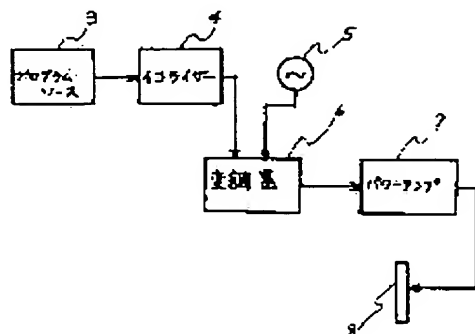
(72)Inventor : YONEYAMA MASAhide

(54) ELECTROACOUSTIC TRANSDUCER

(57)Abstract:

PURPOSE: To obtain an electroacoustic transducer having a smooth frequency characteristic over a broad band of an audible frequency band, by using non-linear operation of definite amplitude sound wave propagating in air and generating audible tone.

CONSTITUTION: A sound pressure of a demodulated sound wave obtained through a non-linear parametric operation is expressed as Equation I and the result of Fourier transformation is shown in Equation II. Since Equation is also proportional to ω^2 , assuming that the frequency characteristics of an ultrasonic wave oscillator are flat in a required band, to reproduce audio signals with fidelity, it is required to pass the modulation signal through an equalizer having the characteristics of $1/\omega^2$ before the amplitude modulation is done. Thus, when the signal passes through an equalizer 4, the sound pressure generated in air is expressed as Equation III, the sound pressure is proportional to the audio signal of a program source 3, no ω is included in the proportional coefficient, allowing to obtain the flat frequency characteristics.



$$P_3 = \frac{\rho c^2 \omega^2}{8 A^2 c^2 \omega^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} E \left(1 - \frac{r}{c} \right) \quad I$$

$$P_4 = - \frac{\rho c^2 \omega^2}{8 A^2 c^2 \omega^2} \cdot \omega^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} \cdot D \cdot \omega \quad II$$

$$P_5 = \frac{\rho c^2 \omega^2}{8 A^2 c^2 \omega^2} \cdot E \left(1 - \frac{r}{c} \right) \quad III$$

LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's

decision of rejection]

[Date of extinction of right]

⑨ 日本国特許庁 (JP)

⑩ 特許出願公開

⑫ 公開特許公報 (A)

昭58—119293

⑪ Int. Cl.³
H 04 R 3/00識別記号
H A C
H A A庁内整理番号
6416—5D
6416—5D

⑬ 公開 昭和58年(1983)7月15日

発明の数 1
審査請求 未請求

(全 5 頁)

⑭ 電気音響変換装置

川崎市川崎区港町5—1日本コ
ロムビア株式会社川崎事業所内

⑮ 特 願 昭57—1396

⑯ 出 願 人 日本コロムビア株式会社

⑰ 出 願 昭57(1982)1月8日

東京都港区赤坂4丁目14番14号

⑱ 発 明 者 米山正秀

⑲ 代 理 人 弁理士 山口和美

明 細 書

1. 発明の名称

電気音響変換装置

2. 特許請求の範囲

- (1) プログラムソースからのオーディオ信号でオーディオ信号周波数帯よりも十分高い周波数をキャリアとして振幅変調する変調器と、該変調器によつて変調された信号を電気音響変換する超音波振動子とを有し、有限振幅超音波を空气中に放射し非線形特性によるパラメトリック作用によりオーディオ信号を得ることを特徴とする電気音響変換装置。
- (2) オーディオ信号の周波数特性をイコライザーを通した後、該振幅変調器に入力することを特徴とする特許請求範囲第(1)項の電気音響変換装置。
- (3) 超音波振動子を複数個配置し、超音波出力周波数特性をスタガー状に結合して成る振動子アレーを具備したことを特徴とする特許請求範囲第(1)項または第(2)項の電気音響変換装

置。

3. 発明の詳細を説明

本発明は可聴周波数帯の電気信号を音響信号として空中に放射するための電気音響変換装置に関するものである。

現在、電気音響エネルギー変換器としては、動電形直接放射スピーカとホーンロードスピーカが主流である。いずれにおいても、空気と接する弾性振動板を機械的に振動させる事により音波を発生させる装置である。これらの装置が有する共通の欠点は広いオーディオ周波数帯で使用しようとすると、弾性振動板の機械的な多重分割共振により、得られる音圧の周波数特性には鋭い共振峰が生じる。この共振峰のQを低下させるために弾性振動板の内部損失を増大させる様な材料学的な配慮が必要である。

更に、弾性振動板の一樣な振動状態を保持せようとする、可聴周波数帯を複数個の帯域に分割し、各々の帯域に専用のスピーカを配する必要があつた。いずれの技術を用いても、現時点では

可聴周波数帯の低域から高域までフラットなまたは滑めらかな周波数特性を得る事は困難である。

本発明は、可聴周波数帯の広帯域に亘つて、滑らかな周波数特性を有する電気音響変換装置を得る事を目的とし、このため従来のスピーカ等の音響変換器とは全く異なる手段、つまり空気の非線形性による有限振幅音波のパラメトリック作用を利用するものである。

媒質中での音波の伝播は線形な波動方程式で記述されているが、これは音圧変動が無限小の場合を仮定しており、この場合のみ有効な方程式である。音波の音圧変動の振幅が次第に大きくなり、無限小とは考える事が出来ず、有限な振幅を有する音波と考えられる場合には、伝播媒質は非線形性を表わし、音波の伝播を記述する波動方程式も非線形な方程式となる。この様な有限振幅音波は非線形性を有するが故に、線形波動伝播特性からは想像出来ない種々の挙動を示す。

種々の非線形効果の中でパラメトリック作用として知られている現象がある。

これは水中で周波数のわづかに異なる2つの有限振幅超音波ビームを同軸上に重ねて放射した場合、水の非線形性により、2つの超音波の差と和の周波数を有する音波が発生する現象である。この場合、発生した音波は、メインビームと同等の指向性パターンを有するのが特徴である。

この現象は水中での超指向性長距離用ソナーに適用する研究がなされている。

本発明は音波のパラメトリック作用に着目し、弾性振動板を直接オーディオ信号で振動させる事なく空気中を伝播する有限振幅音波の非線形作用を利用して可聴音の発生を得んとするものである。今、空気中を進行する有限振幅超音波のエンベロープに時間的変化がある場合には、非線形効果による自己検波作用が生じ、エンベロープ成分の発生が予想される。以下、この件について数学的解析手段により現象を説明する。

超音波振動子に式(1)に示すようなAM波電圧を印加する。

$$V = V_0 (1 + m \cdot g(t)) \cos \omega_0 t \quad (1)$$

ここで、 $g(t)$ ：オーディオ信号、 ω_0 ：超音波領域の角周波数。

ここで、振動子からは有限振幅の超音波平面波ビームが発生するものとし、ビームの半径を a とする。またビームにそつて x 軸を考え振動子面上で $x=0$ とすると振動子からは(1)式で表わされた有限振幅超音波が第1図に示す様に放射されることになる。

今、 x 点での進行波の音圧 P は

$$P = P_0 \left\{ 1 + m \cdot g \left(t - \frac{x}{C_0} \right) \right\} e^{-\alpha x} \cos \left(\omega_0 t - k_0 x \right) \quad (2)$$

ここで、 C_0 ：音速、 α ：角周波数 ω_0 の音波の減衰係数、 $k_0 = \omega_0 / C_0$ 、 P_0 ：初期音圧。

次に、第1図のビーム内の音場を求める。

完全流体を扱つた流体力学における連続の方程式と運動量の方程式をテンソル表示するとそれぞれ次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + C_0^2 \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3)式において、 ρ ：空気の密度、 v_i ：速度テン

ソル、 T_{ij} ：ひずみテンソル。更に T_{ij} は

$$T_{ij} = P \delta_{ij} + \rho v_i v_j - \rho C_0^2 \delta_{ij} \quad (4)$$

(4)式において、 δ_{ij} ：Kroneckerのデルタ関数。したがつて(3)式より ρ に関する次式のごとき波動方程式を得る。

$$C_0^2 \left(\nabla^2 \rho - \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} \right) = - \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (5)$$

式(5)の右辺を計算して、全体をオーディオ信号の音圧 P_0 に関する波動方程式にすると次式を得る。

$$\nabla^2 P_0 - \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 P_0}{\partial t^2} = - \frac{\beta}{\rho_0 C_0^2} \frac{\partial^2 [P^2]_s}{\partial t^2} \quad (6)$$

ただし、 β ：空気の非線形パラメータ。

また $[P^2]_s$ は P^2 の中で変調信号に関与する成分を表わす。式(6)の右辺は超音波の干渉によつてメインビーム中に生ずるオーディオ信号の仮想音源密度を表わし、左辺は、これによつて生じるオーディオ音源の音圧音場を表わしている。式(2)より $[P^2]_s$ を計算すると次式のごとくなる。

$$[P^2]_s = P_0^2 \left\{ m \cdot g \left(t - \frac{x}{C_0} \right) + \frac{1}{2} m^2 g^2 \left(t - \frac{x}{C_0} \right) \right\} e^{-2\alpha x} \quad (7)$$

ここにおいて、 m は変調の深さを表わすパラメータで $m < 1$ である。今、 $m \ll 1$ が成り立つような浅い変調を考えると、式(7)右辺の第2項は第1

項に比べて十分小さくなり無視出来る。

したがって、この場合には

$$[P]_s = P_{sm} \cdot g\left(t - \frac{r}{C_0}\right) e^{-2\alpha r} \quad (8)$$

式(8)を用いて、式(6)の波動方程式を解くと

$$P_s = \frac{\beta P_{sm}^2}{4\pi A C_0^2} \iint \frac{e^{-2\alpha |r'|}}{|r' - r|} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} g\left(t - \frac{|r'|}{C_0} - \frac{|r' - r|}{C_0}\right) d|r'| \quad (9)$$

ただし、 r : 観測点の位置ベクトル、 r' : 音源の位置ベクトル。

いま、超音波が円筒状のビームを形成していると仮定し、遠方音場近似を用いて(9)式の積分を実行すると次式を得る。

$$P_s = \frac{\beta P_{sm}^2}{8 A C_0^2 \alpha r} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} g\left(t - \frac{r}{C_0}\right) \quad (10)$$

ただし、 r は振動子の中心から、軸上の観測点までの距離を表わす。

式(10)が非線形パラメトリック作用によつて得られる復調音波の音圧を表わしている。

勿論、ビーム中にはこの外にも ω_0 成分が存在し更に非線形効果によつて $2\omega_0$ 成分も発生する。しかし、 ω_0 を十分に高い周波数に設定しておけば、これ等の成分は空気中での減衰が激しいために比

較的に早く消散し、遠方での音場としては式(10)で表わされる成分のみが現れることになる。

ここで $P_s(t)$ および $g(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ次のごとく表わす。

$$P_s(t) \longleftrightarrow P(\omega), \quad g(t) \longleftrightarrow G(\omega)$$

式(10)の両辺をフーリエ変換すると

$$P(\omega) = - \frac{\beta P_{sm}^2}{8 A C_0^2 \alpha r} \omega^2 e^{-j\omega r/C_0} G(\omega) \quad (11)$$

式(11)は ω^2 に比例している事が認められる。

したがって、もし超音波振動子の周波数特性が必要帯域内で平坦であると仮定するならばオーディオ信号の忠実再生のためには振幅変調をおこなう以前に変調信号を予め $1/\omega^2$ のイコライザ(例えば-12dB/octに相当するイコライザ)に通す必要がある。

この場合、パラメトリック作用により、空中において発生する音圧は

$$P_s(t) = \frac{\beta P_{sm}^2}{8 A C_0^2 \alpha r} g\left(t - \frac{r}{C_0}\right) \quad (12)$$

で示される。

本発明の構成を第2図に示す。

$f_s = 1.0 \text{ KHz}$ のとき $m = 0.05$ に調整すると $1/\omega^2$ の

$$P_s = \frac{\beta P_{sm}^2}{8 A C_0^2 \alpha r} \cos \omega_s t \quad (13)$$

一方、第2高調波成分(パラメトリック作用によつて発生する)の音圧は式(7)、(10)より

$$P_2 = \frac{\beta P_{sm}^2}{8 A C_0^2 \alpha r} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{1}{4} m^2 + \frac{1}{4} m^2 \cos 2\omega_s t \right) = \frac{\beta P_{sm}^2 m^2}{8 A C_0^2 \alpha r} \cos 2\omega_s t \quad (14)$$

したがって、第2高調波ひずみ率は

$$\varepsilon = \frac{|P_2|}{|P_s|} \times 100\% = m \times 100\%$$

ε と周波数の関係を表-2に示す。

表-2

f	250 ^{HZ}	500 ^{HZ}	1 ^{KHZ}	2 ^{KHZ}
ε	79%	19.9%	5%	1.25%

イコライザの周波数特性を第3図に示す。更にこの場合のスピーカの周波数特性を第4図に示す。

式(12)を検討すると、音圧 $P_s(t)$ はプログラムソースのオーディオ信号に比例している。更に比例係数には ω が含まれないので、平坦な周波数特性が得られることがわかる。

次に電気音響変換器の一実施例について説明する。

第5図に示すごとく電気音響変換器への入力信

イコライザにより、 $f_s = 220 \text{ Hz}$ のとき $m = 1$ (100%変調)となるので、周波数特性の平坦特性の下限は 220 Hz となる。振動子アレーの半径を $R = 10 \text{ cm}$ とし、これより 2 m 離れた軸上の点でのオーディオ音波の音圧を初期音圧 P_0 をパラメータとして計算した結果を表-1に示す。

計算に当つて、式(12)の各パラメータの値を次の様に決めた。

$\beta = 1.2$, $P_0 = 1.2 \text{ kg/m}^2$, $C_0 = 340 \text{ m/s}$, $\alpha = 0.19 \text{ neper/m}$, $m = 0.05$ (=1 KHzのとき), $r = 2.0 \text{ m}$

表-1

$P_0 \text{ (dB)}$	120 ^{dB}	130	140	150	160
$P_2 \text{ (dB)}$	20 ^{dB}	40	60	80	100

したがって、この場合には、実用的になる程度の音圧を得るためには、初期音圧として150~160 dBが必要である。

次に変調信号を正弦波とした時の第2高調波ひずみ率について計算する。

$g(t) = \cos \omega_s t$ とすると、得られる信号音圧は式(12)より

号は角周波 ω を中心として $\pm 15\text{kHz}$ つまり 30kHz の帯域幅を有している。したがって電気信号を音響信号に変換する電気音響変換器においても ω を中心周波数として 30kHz の帯域幅が要求される。

パラメトリック・スピーカ用の電気音響変換器としては次の2点を満たす必要がある。

- (1) 有限振幅レベルの超音波を発生する事。
- (2) 少なく共、 30kHz の帯域を有する事。

上記(1)の条件を満たすためには、単一の振動子を用いるよりも、第6図に示す様に複数の振動子をアレー状に配置して用いた方が有利である事が既に知られている。

更に超音波の周波数が高くなると、電気音響変換能率が低下し、また空気中での減衰も激しくなるので、 ω としては余り高い周波数は望ましくない。

次に上記(2)の条件を満たすことを考える。

一般に超音波振動子のQは相当に高いので、帯域幅を確保するためには、出来るだけ ω を高く選んだ方が有利である。

したがって、上記条件(1)(2)はお互いに矛盾することが解る。この矛盾を解決する一方法として比較的低い ω を選び、アレーを構成している各振動子の共振周波数を適当に異なる周波数に設定し、各振動子を並列駆動した時、変換器全体として第7図に示すように各振動子の周波数帯域がスタガー状につながり、全体として必要帯域^(ω)をカバーする様にすればよい。

例えば仮りに、 $f_1 (= \omega/2)$ を 100kHz とすると振動子アレーとしては 85kHz から 115kHz までを少なくともカバーしなくてはならない。今、振動子のQを50前後と仮定し、 100kHz 付近においては3低下点での帯域幅を 2kHz と考え、各振動子は相隣接する振動子と6低下点で相交わる様に設定すると各振動子間の中心周波数の差は 4kHz とかなり、 30kHz 帯域幅を確保するには約8個の振動子が必要である。

上記の様に比較的低い超音波を用いても必要帯域が確保出来るので、広帯域有限振幅波を放射しやすくパラメトリックスピーカの実現が可能であ

る。

4. 図面の簡単な説明

第1図は振動子より有限振幅の超音波が放射され、平面波として伝播していく様子を示す。

第2図は本発明の一構成図である。

第3図は本発明の一実施例に用いられるイコライザーの周波数特性を示す。

第4図は本発明の一実施例の音量出力である音圧周波数特性を示す。

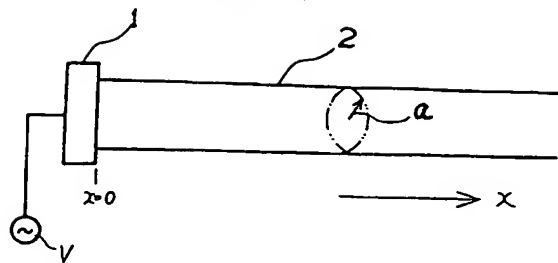
第5図は本発明の一実施例の変調された信号の周波数スペクトラムを示す。

第6図は振動子をアレー状に配置する一実施例を示す。

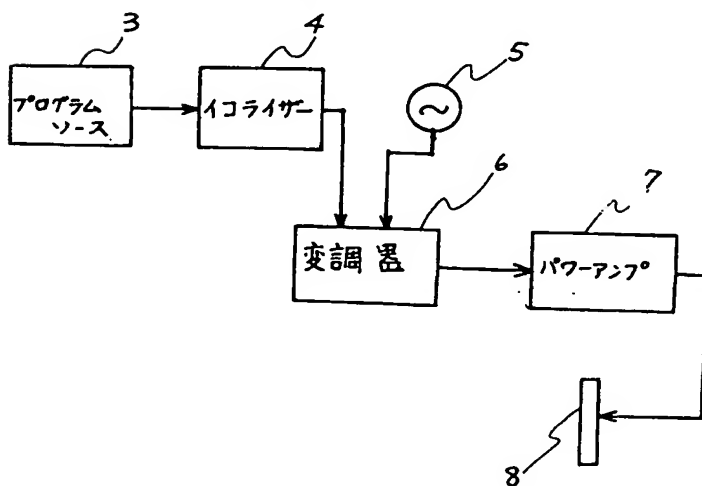
第7図は第6図の各振動子の周波数特性をスタガー状に結合して広帯域な特性を得ることを示す図である。

1は超音波振動子、2はビーム、3はプログラムソース、4はイコライザー、5は発振器、6は振幅変調器、7はパワーアンプ、8は振動子アレーである。

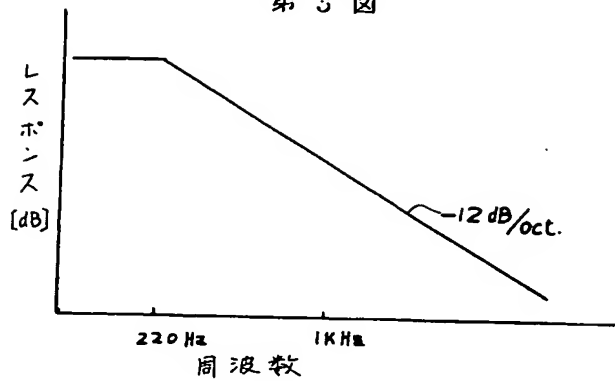
第 1 図



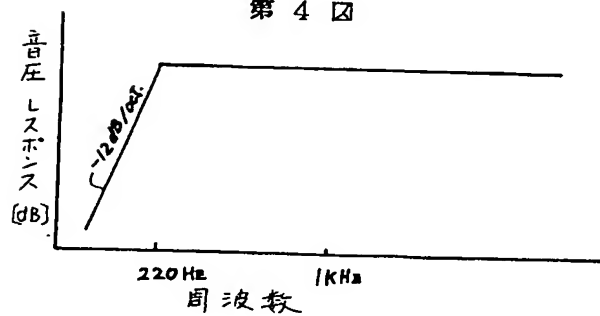
第 2 図



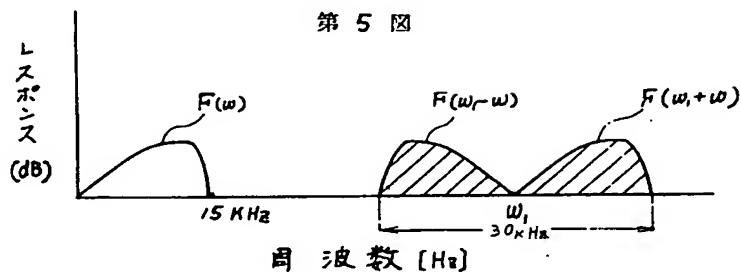
第 3 図



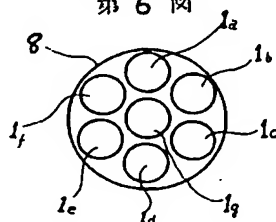
第 4 図



第 5 図



第 6 図



第 7 図

